

GaAs를 이용한 MIS형 다이오드의 제작 및 전기적 특성

(Fabrication of MIS Type GaAs Diode and Its Electrical Characteristics)

鄭 期 太*, 鄭 鎬 宣*

(Ki Tae Jeong and Ho Sun Chung)

要 約

Undoped GaAs와 Te-doped GaAs를 사용한 MIS형 다이오드를 제작하여 그 전기적특성 및 광특성을 조사하였다. Ohmic접촉 및 쇼트키접촉물질로는 각각 Au와 AuGe/Ni을 사용하였다. GaAs표면의 산화막 성장은 공기중에서 열처리하는 방법과 상온에서 수증기로 포화된 산소를 통과시키는 방법을 사용하였다. Te-doped GaAs를 사용하여 제작된 MIS형 다이오드의 cutin전압은 산화막을 기르기에 비해 평균 3V 정도 증가하였다. 이 다이오드의 광특성에서 fill factor는 약 64%였으며 개방전압은 0.67V였다.

Abstract

The fabrication sequence of GaAs MIS type diode and its electrical characteristics are presented. Used wafers were undoped GaAs wafer and Te-doped GaAs wafer. Au and AuGe/Ni was used as schottky contact metal and ohmic contact metal respectively. Oxide layer on GaAs surface was formed by water vapor saturated oxide growth technique and dry oxidation technique. In Te-doped GaAs wafer, cutin voltage of MIS type diode was enhanced about 3V comparing with non-oxide layer diode. From light I-V characteristics fill factor of MIS type Te-doped GaAs diode was about 64%, Voc (open circuit voltage) was 0.67V.

I. 序 論

GaAs를 이용한 전자소자는 크게 광학소자와 고주파 소자로 나눌 수 있다. 광학소자로는 LED, 반도체 레이저, 태양전지등을 예로 들 수 있으며, 고주파소자로는 Gunn다이오드, 고주파용FET, 쇼트키다이오드 등을 예로 들 수 있다. 이 중 쇼트키다이오드를 제작하는데 있어 문제점중의 하나는 metallization과정이다.^{1,2} 이 과정에서 금속과 반도체간의 상호확산, 전하이동, 결정결함의 발생등의 효과가 소자의 전기적특성에 큰 영향을 준다. GaAs를 이용한 MIS형 다이오드의 제작

은 이 metallization과정과 더불어 GaAs표면의 산화막 성장과정이 매우 중요하다. 왜냐하면 Si과는 달리 GaAs표면의 산화층 성장은 쉽게 이루어지지 않기 때문이다.³

본 논문에서는 AuGe, Ni 및 Au등을 ohmic접촉과 쇼트키 접촉물질로 Te-doped GaAs (sumitomo社 제품)와 undoped GaAs (KAIST 제품)에 증착하여 쇼트키다이오드를 만들었다. 그다음 공기중에서 100°C로 열처리만을 하는 방법과 상온에서 수증기로 포화된 산소를 통과시키는 방법으로 산화층을 기른 MIS (Metal-Insulator Semiconductor)형 다이오드를 제작하여 그 전기적특성 및 광특성을 조사하였다.

*正會員, 慶北大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyung Pook National Univ.)
接受日字: 1985年 7月 1日

II. 理 論

1. 금속-반도체 접합전류

금속과 반도체에 있어서 전류는 주로多數運搬子에 의해서 이루어 진다. 그 전류는 전위장벽을 넘어서 금속쪽으로의 전하이동에 의한 효과로서 이는 thermionic 현상과 확산현상으로 다시 분류될 수 있다. GaAs 의 경우, 높은 전하이동도(8500cm²/V·s) 때문에 thermionic 현상에 의한 전류가 주가 된다!⁴⁾

그림 1 은 인가한 전압에 따른 쇼트키다이오드의 에너지帶域圖이다.

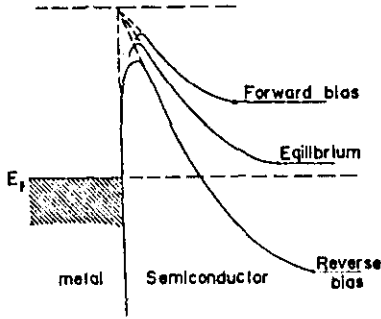


그림 1. 인가전압에 따른 쇼트키다이오드의 에너지帶域圖

Fig. 1. Band diagram of schottky diode under different bias conditions.

쇼트키다이오드에 있어서 thermionic 현상에 의한 전류식은

$$I = I_0(e^{V/nV_T} - 1) \quad (1)$$

$$I_0 = AR^*T^2 \exp(-\phi_{bn}/V_T) \quad (2)$$

이다. 여기서 A는 접합면적이며 n은 ideality factor로서 주로 금속과 반도체사이에 존재하는 산화물에 의해 발생하는 인자이다. R은 effective richardson constant이다!⁵⁾ ϕ_{bn} 은 금속과 반도체간의 장벽높이로서 그 크기는 surface state로 인해 금속의 일함수에는 관계없이 불순물농도와 반도체간의 영상전하효과로 인해 생성된다. 또한 ϕ_{bn} 은 그림 1과 같이 전압에 의하여 변화하는데 이 변화량 $\Delta\phi$ 는

$$\Delta\phi = (qE_{ext}/4\pi\epsilon_0)^{1/2} \quad (3)$$

이다. 여기서 E_{ext} 는 외부인가전계이다. 따라서 I_0 는

$$I_0 = AR^*T^2 \exp(-q(\phi_{bn} - \Delta\phi)/KT) \quad (4)$$

이고, 영상효과까지 고려한 전체전류식은

$$I = AR^*T^2 \exp(-q(\phi_{bn} - \Delta\phi)/KT) [\exp(qV/KT) - 1] \quad (5)$$

이 된다. 식(5)로부터 n과 ϕ_{bn} 은

$$n = q/KT \cdot \partial V / \partial (\ln I) = [1 + \partial \Delta\phi / \partial V + KT/q \cdot \partial (\ln R^*) / \partial V] \quad (6)$$

$$\phi_{bn} = KT/q \ln(R^*T^2/I_0) \quad (7)$$

이다.

또한 C-V측정결과로부터 불순물농도와 장벽높이 ϕ_{bn} 을 구할 수 있는데

$$Nd = 2/(qK\epsilon_0 \cdot A) \cdot d(V + V_{bi})/d(1/C) = 2/(qK\epsilon_0 A) \cdot \Delta V_R / \Delta(1/C^2) \quad (8)$$

$$\phi_{bn} = V_i + V_n + KT/q - \Delta\phi \quad (9)$$

이다. 여기서 $V_n = V_T \ln(N_c/N_d)$ 이며 V_i 는 built-in 전압이다.

2. MIS형 다이오드의 광특성.

그림 2는 MIS형 다이오드의 에너지帶域圖를 나타낸다.

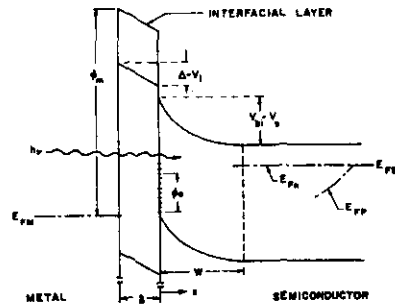


그림 2. MIS형 다이오드의 에너지帶域圖

Fig. 2. Energy band diagram of MIS type diode.

위와 같은 에너지帶域圖를 가지는 MIS형 다이오드의 광특성은 다음과 같다!⁶⁾

$$I = I_L - T_C R^* T_s \exp(-\phi_{bn}/KT) \{ \exp(V_S/KT) - \exp(V_i/KT) \} - T_V [(p_{n0} D_p) / L_p] [\exp(V/KT) - 1] \quad (10)$$

$$V = V_S + \phi_m^{eff} - V_{bi} - V_n - x - Q_{ss}(W/\epsilon_i) - (2KT\epsilon_{se}N_D)^{1/2} \times (W/\epsilon_i) [(V_{bi} - V_S)/KT + (N_D^2/N_A^2) \exp(E_{FVS}/KT) \{ \exp((V_{bi} - V_S)/KT) - 1 \} + \exp(-(V_{bi} - V_S)/KT) - 1]^{1/2}$$

여기서 I_L 은 광전류이며 T_C , T_V 는 각각 전자와 정공에 대한 전류전달상수이다. V_i 는 절연층사이의 전압이며 V_S 는 반도체내에 인가되는 전압이다. ϕ_m^{eff} 는 유효 금속일함수이며 N_D , N_A 는 각각 n형 도핑농도, 眞性 반도체의 밀도이다.

III. 실험

그림 3은 제작된 MIS형 GaAs 다이오드의 구조이다. 그림 3과 같은 다이오드의 제조공정은 그림 4와 같다. Undoped GaAs기판은 표면이 연마되지 않은 상태이므로 먼저 0.5 μ m의 알루미늄분말로 회전테이블위에서 연마한 후, 다시 0.05 μ m의 분말로 연마하였다. 연마시 GaAs의 표면은 약50~100 μ m정도 깎여졌다. 연

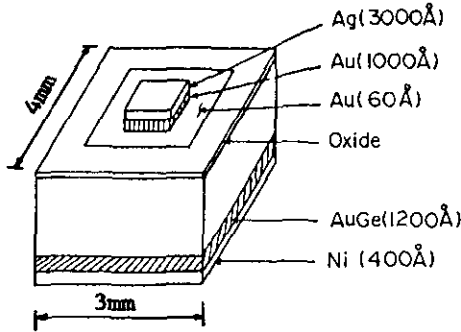


그림 3. MIS형 다이오드의 구조
Fig. 3. Structure of MIS type diode.

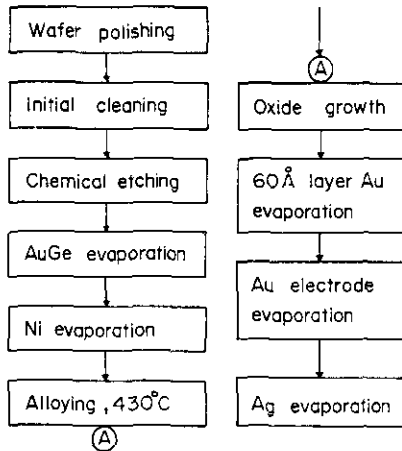


그림 4. MIS형 GaAs다이오드의 제조공정
Fig. 4. Fabrication sequence of MIS type GaAs diode.

마된 웨이퍼를 TCE, Acetone, Methanol의 순으로 각각 10분씩 가열하여 세척후 표면연마시 생긴 결정결함등을 제거하기 위해 에칭을 하였다. 이때 사용된 약품은 $3H_2SO_4 : 1H_2O_2 : 1H_2O$ 로서 4°C 정도 냉각시켜 5분간 에칭한 결과 결정방향에 관계없이 特方性으로 에칭됨이 관찰되었다. Ohmic접촉을 위한 급속으로는 AuGe/Ni이 대표적인데 표 1에는 GaAs표면에 대한 ohmic 접촉물질들을 나타내고 있다.

Ohmic접촉을 위해서는 GeAu 합금과 Ni을 따로 증착시켜야 하는데 여기서 사용된 AuGe합금은 Au와 Ge를 88 : 12의 무게비로 용융하여 만들었다. AuGe합금제작 방법은 먼저 제량된 Au와 Ge를 quartz tube에 고르게 담아 10^{-6} Torr 정도의 진공상태로 만든 뒤, 산소-프로판가스 불꽃으로 tube를 봉합하였다. 이렇게 봉합된 tube를爐에 넣고 1200°C 정도로 가열하여 합금을 만들었다. Ohmic접촉형성을 위한 AuGe와 Ni의 무게

표 1. GaAs에 대한 ohmic접촉물질
Table 1. Ohmic contact material to GaAs.

Type	Contact	Technique	Alloy Temp
GaAs p	Au-Zn(99 : 1)	Preform	
		Evap	
p	In-Au(80 : 20)	Preform	
n	Au-Ge(88 : 12)	Evap	350-450
n	In-Au(90 : 10)	Evap	550
n	Au-Si(94 : 6)	Evap	300
n	Au-Sn(90 : 10)	Evap	350-700
n	Au-Te(98 : 2)	Evap	500

는 3 : 1이 적당한 것으로 보고되었다.⁷⁾ 본 실험에서는 1200Å, 400Å 정도로 웨이퍼되었는데 2×10^{-6} Torr의 진공도로 증착하였다. 증착된 AuGe/Ni을 Ar 분위기에서 430°C, 1분20초간 열처리하여 ohmic 접촉형성을 하였다. 이때 튜브내의 산소가 완전히 제거되지 않았을 때에는 Ni이 푸르게 산화되는 것을 볼 수 있었다. GaAs표면의 산화층은 주로 Ga_2O_3 , As_2O_3 로 형성되는데 보통 ohmic접촉이후에 시행한다. 왜냐하면 이미 산화층을 형성시킨 웨이퍼에 ohmic접촉을 형성할 때는 열처리과정에서 산화막이 분해될 수 있기 때문이다. GaAs표면위의 산화막을 기르는 방법에는 수증기로 포화된 산소나 O_3 를 통과시키는 방법과 plasma oxidation 방법, anodic oxidation방법등이 발표되었으며 상온에서 수증기로 포화된 산소를 이용하여 산화막을 기를 경우 10시간이 지나고 부터 자연상태에서 이미 형성된 약20Å의 산화막두께가 서서히 증가하기 시작하여 60시간이 지났을 때 30Å으로 증가함이 보고되었다.⁸⁾

GaAs표면위의 산화막은 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)분석결과 자연상태에서 길러진 약 20Å의 산화막은 주로 As_2O_3 로 구성되어있고 이 산화막을 Br-Methanol로 제거한 뒤 상온에서 수증기로 포화된 산소를 통과시켜 산화막을 길렀을 때 (100) surface의 경우 As_2O_3 는 Ga_2O_3 에 비해 85%의 조성비를 나타내 이 보고되었다.⁸⁾

본 논문에서는 수증기로 포화된 산소를 상온상태의 웨이퍼에 통과시키는 방법과 공기중에서 웨이퍼를 100°C로 열처리만을 하여 기르는 dry oxidation방법 두가지를 택하였다. 이때 사용된 웨이퍼는 Br-Methanol을 사용하여 에칭을 한뒤 산화막을 성장시켰다. 각각에 대한 실험장치가 그림 5에 나타나 있다.

산화시간은 70시간동안 시행하였다. 산화 공정사는 ohmic접촉의 산화를 방지하기 위해 PR coating을 하여 보호하였다. Schottky barrier 급속은 고순도의 Au로서 60Å정도 증착하였다. Au는 Al에 비해 급속이 잘

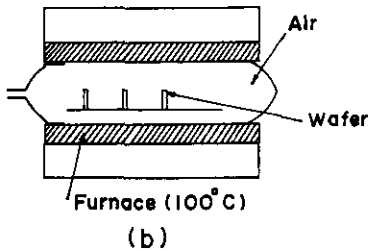
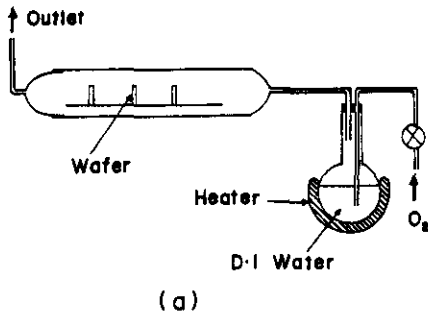
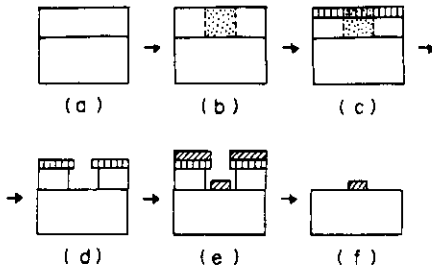


그림 5. 산화막형성을 위한 장치도
 Fig. 5. Equipment for oxidation.
 a) Water vapor saturated oxidation
 b) Dry oxidation

생기기 때문에 측정시 굽힘을 방지하기 위해 Au 위에 3000Å 정도의 Ag를 다시 증착하였다. 쇼트키다이오드의 패턴형성은 single step lift-off방식을 사용하였다. 이 방식은 보다 정밀한 패턴도 얻을 수 있으며 금속에 청과정이 생략되는 장점을 지니고 있다.¹⁾ 그림 6에는 lift-off 과정이 나타나 있다. 그 순서는 아래와 같다.



a) PR coating
 b) UV exposure
 c) Chlorobenzene soak (15 min)
 d) Develop
 e) Metal evaporation
 f) Metal lift-off

그림 6. lift-off 공정도
 Fig. 6. Sequence of lift-off process.

먼저 Az-1350J positive PR을 4,000rpm속도의 spinner로 coating한 후 80°C에서 30분간 soft baking하였다. 그 다음 4.5초간 UV照射를 한뒤, metal 증착시 metal이 잘 끊어지도록 하기 위하여 chlorobenzene용액에 15분간 담구었다. 그다음 develop를 한뒤, metal 증착을 하여 lift-off를 하였다.

VI. 실험결과 및 고찰

1. Undoped GaAs소자의 전기적특성

KAIST에서 길러진 undoped GaAs의 성분, 결정방향 및 캐리어농도를 알아내기 위해 X-선 분석및 Van der Pauw法을 시행하였다. 그림 7은 undoped GaAs에 대한 X-선 회折圖이다.

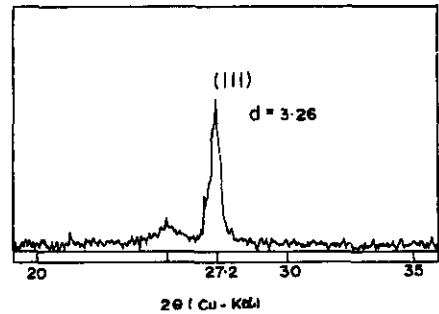


그림 7. Undoped GaAs에 대한 X-선 회折圖
 Fig. 7. X-ray analysis for undoped GaAs.

이결과, 본 실험에서 사용된 undoped GaAs는 (111)의 결정방향이며 불순물은 검출되지 않았다. 그러나 이 웨이퍼의 캐리어는 대부분 웨이퍼제작시 들어간 산소에 의한 캐리어인 것으로 추정되고 있다. 그림 8은 Hall계수측정을 위한 Van der Pauw방법을 나타내고 있다.

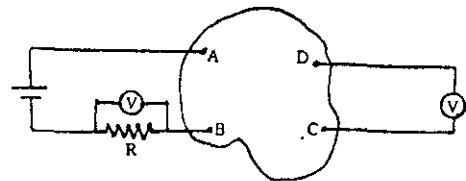


그림 8. Hall계수측정을 위한 장치도
 Fig. 8. Scheme of Hall measurement.

그림 8에서 A와B사이의 전압 V_{AB} 와 C와 D사이의 전압 V_{CD} 를 측정하여 다음의 식에서 R_{ACBD} 와 R_{ACDB} 를 구한다.

$$R_{ABCD} = V_{CD} X \text{ 표준저항} / V_{AB} \quad (12)$$

$$R_{ACBD} = V_{BD} X \text{ 표준저항} / V_{AC} \quad (13)$$

윗식을 이용하여 비저항 ρ 를 구하면

$$\rho = (I_{nz} / 2\pi) \cdot d \cdot [(R_{ABCO} + R_{ACBD}) / 2] \cdot f(ABCD) \quad (14)$$

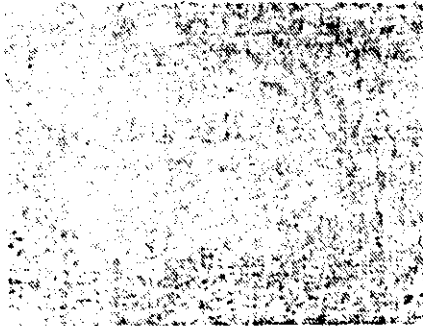
여기서 d 는 웨이퍼두께이고 $f(ABCD)$ 는 R_{ABCO} 와 R_{ACBD} 의 비로 주어지는 함수이며 그 값은 근사적으로 1의 값을 갖는다. ρ 가 결정되면 磁場에서의 R_{ACBD} 와 R_{ABCO} 를 구하고 이값을 이용하여 이동도 μ 를 구하면

$$\mu = [d\Delta R / (B \cdot \rho)] \cdot 10^8 \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)} \quad (15)$$

여기서 $\Delta R = |R_{ABCO} - R_{ACBD}|$, B 는 磁場의 세기(Gauss) ρ 는 比抵抗의 값($\Omega\text{-cm}$)이다. 윗식들을 이용하여 Hall계수 R_H 와 캐리어농도 n 을 구할 수 있다.

$$R_H = \rho \mu, \quad n = 1 / (R_H \cdot e) \quad (16)$$

Undoped GaAs의 경우 ohmic접촉이 불안정하여 Van der Pauw방법에 의한 측정은 할 수 없었다. 이 방법을 써서 역시 본 실험에서 사용된 Te-doped GaAs를 측정한 결과 $\mu = 3.77 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$, $\rho = 2.39 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$, $n = 6.9 \times 10^{17} / \text{cm}^2$ 으로 나타났다. 그림 9는 undoped GaAs에 AuGe와 Ni를 증착시켜 열처리하지 않



(a)



(b)

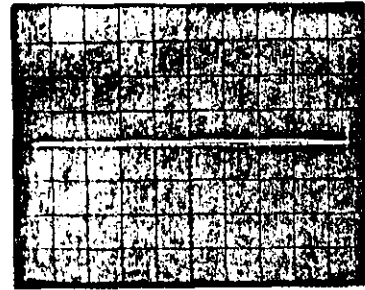
그림 9. Ohmic접촉표면의 SEM사진 ($10^4\times$)

a) 열처리 전, d) 열처리 후

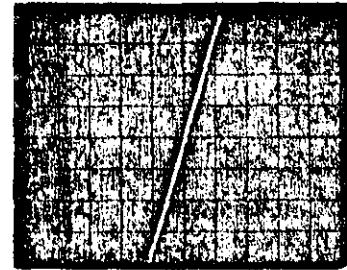
Fig. 9. SEM photomicrograph of ohmic contact surface.

a) Before alloying, b) After alloying

았을 때와 열처리했을 때의 SEM사진을 나타내 주고 있으며 그림10은 각각에 대한 ohmic접촉의 I-V특성을 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림10. Undoped GaAs ohmic접촉간의 전류 및 전압특성

Fig. 10. I-V characteristics of undoped GaAs ohmic contact. (Horizontal : 0.2V/Div., Vertical : 0.2mA/Div.)

a) Before alloying b) After alloying

[I-V특성으로 부터 열처리하지 않았을 때는 금속과 반도체간이 쇼트키접촉이 되어 있음을 알 수 있다. SEM 사진에서 열처리했을 경우 나타나는 반점은 Au와 Ge의 indiffusion과 Ga의 outdiffusion현상으로 추정되고 있다. 그림11은 undoped GaAs에 있어서 ohmic접촉간의 열처리시간에 따른 저항의 변화이다. 이때 온도는 430°C 로 고정하였다.

그림에서 알 수 있듯이 1~3분간은 저항의 변화가 거의 일어나지 않았으나 시간이 증가할수록 저항이 증가함을 알 수 있다. 본 실험에서는 1분20초간 시행하였다. 그림12는 lift-off이후의 ohmic 접촉패턴으로 150배 확대한 사진이다.

윗그림으로 부터 chlorobenzene처리를 하지 않았을 때는 패턴의 가장자리가 많이 손상되었음을 알 수 있다. 그림13은 undoped GaAs에 대한 쇼트키접촉금속으로 Au와 Al을 사용했을 때의 I-V특성이다.

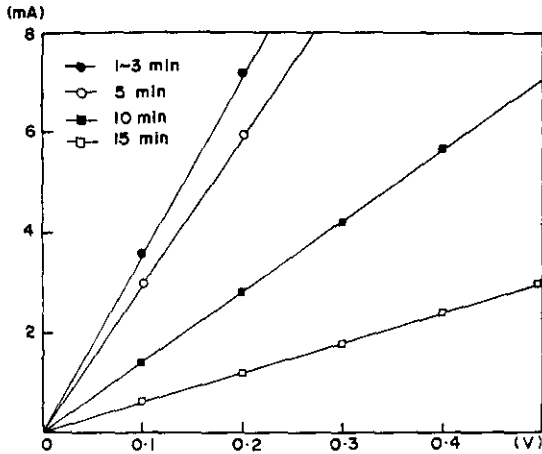


그림11. 열처리시간에 따른 ohmic접촉간의 저항의 변화

Fig. 11. I-V characteristics between ohmic contact under different alloying time.

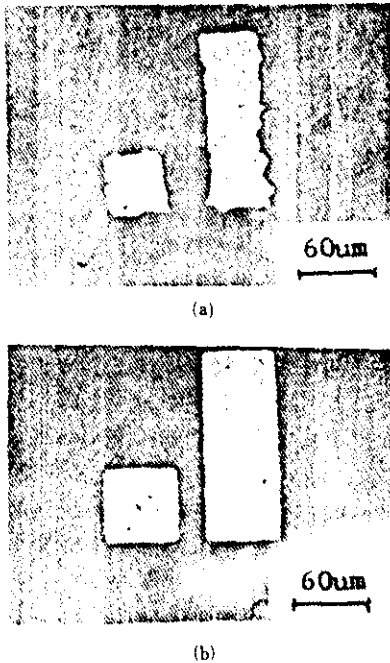


그림12. lift-off 패턴의 현미경사진
 a) Chlorobenzene처리를 하지 않았을 때
 b) Chlorobenzene처리를 했을 때
 Fig. 12. Photomicrograph of lift-off pattern.
 a) Without chlorobenzene soak
 b) After chlorobenzene soak

Au를 사용했을 때의 전류전도도가 Al을 사용했을 때의 전류전도도보다 좋아짐을 알 수 있다. Au를 사용했을 때의 쇼트키다이오드에서 I-V특성결과 ideality

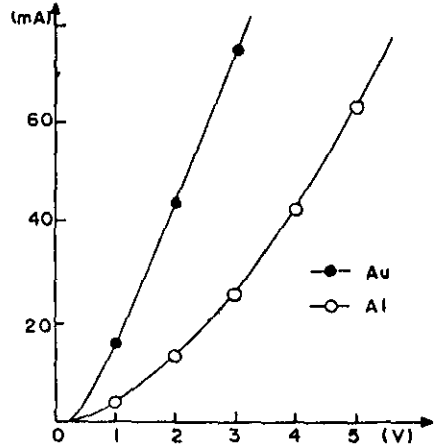


그림13. Undoped GaAs 쇼트키다이오드의 전류 및 전압특성

Fig. 13. I-V characteristics of undoped GaAs schottky diode.

factor n 은 1.64, 장벽높이 ϕ_{bn} 은 0.7V임을 알 수 있었다. C-V 측정결과 undoped GaAs의 캐리어농도는 $8 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 으로 나타났다. 그림14는 수증기로 포화된 산소로서 산화막을 형성시킨 MIS형 다이오드의 광특성을 나타낸다.

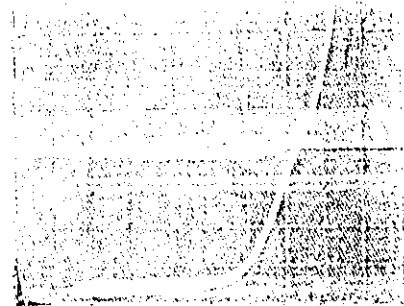


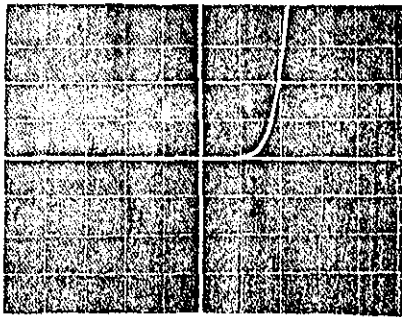
그림14. Undoped GaAs를 이용한 MIS형 다이오드의 광특성

Fig. 14. Light I-V characteristics of MIS type undoped GaAs diode. (Horizontal : 0.2V/Div., Vertical : 0.2mA/Div.)

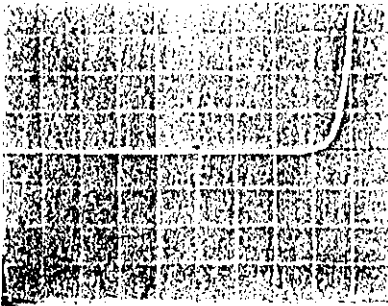
2. Te-doped GaAs소자의 전기적특성

그림15는 산화층을 기르지않은 schottky diode의 I-V특성과 수증기로 포화된 산소로서 70시간동안 산화막을 길렀을 때의 MIS형 다이오드의 I-V특성을 나타낸다.

그림16은 그림15-(a)의 쇼트키다이오드에서 측정된 C-V특성결과로부터 계산한 $1/C^2$ 의 값이다. 이 값으로부터 계산한 Te-doped GaAs의 캐리어농도는 $7 \cdot 7$



(a)



(b)

그림15. Te-doped GaAs 다이오드의 전류 및 전압 특성

- a) 산화층을 기르지 않았을 때
- b) 산화층을 길렀을 때

Fig. 15. I-V characteristics of Te-doped GaAs diode. (Horizontal : 0.2V/Div., Vertical : 20 μ A/Div.)

- a) Without oxidation, b) After oxidation

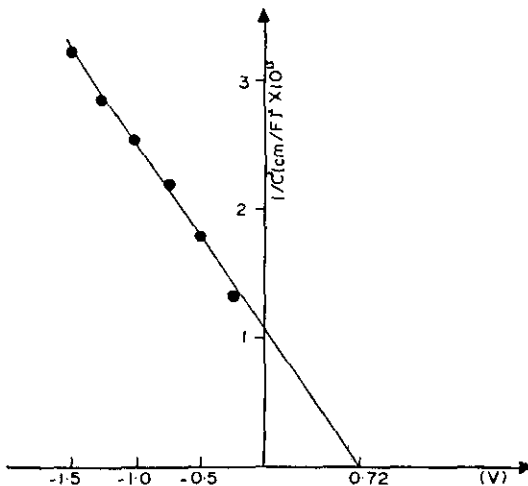


그림16. Te-doped GaAs 쇼트키다이오드의 전압에 대한 $1/C^2$ 의 값

Fig. 16. $1/C^2$ versus applied voltage for Te-doped GaAs schottky diode.

$\times 10^{17}/\text{cm}^2$ 로서 Van der Pauw 방법으로 계산된 캐리어 농도값 $6.9 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 와 거의 일치됨을 볼 수 있었다.

그림17은 산화막을 성장시킨 MIS형 다이오드의 광특성이다. 개방전압은 0.67V를 나타내고 있으며 역시 수증기로 포화시킨 산소를 70시간 흘려 산화막을 형성시켰다. 그림17에서 나타난 MIS형 다이오드의 광특성에서 fill factor는 약 64%를 보였다.

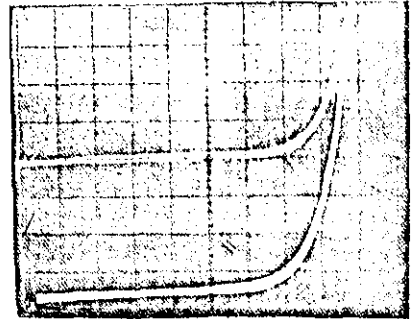


그림17. MIS형 Te-doped GaAs 다이오드의 광특성
Fig. 17. Light I-V characteristics of MIS type Te-doped GaAs diode. (Horizontal : 0.2V/Div., Vertical : 0.2mA/Div.)

V. 결론

Undoped GaAs와 Te-doped GaAs를 사용한 MIS형 다이오드를 제작하여 그 전기적 특성 및 광특성을 조사하였다.

Ohmic접촉은 AuGe/Ni을 증착하여 Ar 분위기에서 430 $^{\circ}$ C 1~3분 정도 열처리함으로써 가장 좋은 특성을 얻을 수 있었다.

산화막 성장실험으로는 수증기로 포화시킨 산소를 이용하는 방법이 훨씬 높은 성장속도를 보였다.

Undoped GaAs를 사용한 MIS형 다이오드는 ohmic접촉의 불량등으로 인해 좋지 않은 전기적특성을 보였다.

Te-doped GaAs의 경우 쇼트키다이오드의 cutin 전압은 0.3~0.4V였으며 산화막을 성장시킨 MIS형 다이오드의 cutin전압은 0.6~0.7V로 나타났다.

Te-doped GaAs 웨이퍼로 만든 MIS형 다이오드의 광특성에서 fill factor는 약 64%였고 개방전압은 0.7V 정도였다.

참고 문헌

- [1] M. Heiblum et al., "Characteristics of AuGeNi ohmic contacts to GaAs," *Solid-State Electronics*, vol. 25, pp. 185-195, 1982.
- [2] A. Piotrowska et al., "Ohmic contacts to III-V compound semiconductor A review

- of fabrication techniques," *Solid-State Electronics*, vol. 26, pp. 179-197, 1983.
- [3] R.J. Stirn et al., "Technology of GaAs metal-oxide-semiconductor solar cells", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 24, pp. 476-483, 1977.
- [4] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 245-311, 1981.
- [5] A.K. Srivastava et al., "Measurement of richardson constant of GaAs schottky barriers," *Solid-state Electronics*, vol. 24, pp. 185-191, 1980.
- [6] S.J. Fonash, "Outline and comparison of the possible effects present in a metal-thin-film-insulator-semiconductor solar cell," *J. Appl. Phys.*, vol. 47, pp. 3597-3602, 1976.
- [7] A. Christou, "Solid phas formation in Au:Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au:Ge GaAs ohmic contact systems," *Solid-State Electronics*, vol. 22, pp. 141-149, 1979.
- [8] Richard J. Stirn et al., "Technology of GaAs Metal-Oxide-Semiconductor solar cells", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-24, pp. 476-483, 1977.
- [9] M. Hatzakis et al., "Single step life-off process," *IBM J. Res Develop.*, vol. 24, pp. 453-460, 1980.
-